

LUDWIGSWINKEL - BÂTIMENT RÉNOVÉ

Étude WUFI



Sommaire

1	HYPOTHESES	3
1.1	MATERIAUX	3
1.2	CONDITIONS INITIALES	4
1.3	CLIMAT EXTERIEUR	4
1.3.1	Température et humidité relative	4
1.3.2	Pluviométrie	5
1.4	CLIMAT INTERIEUR	6
1.5	CRITERES D'INTERPRETATION	7
2	TESTS DES MATERIAUX - MAISON LUDWIGSWINKEL.....	8
2.1	PORTION DE MUR ETUDIEE	8
2.2	RESULTATS ISOLANT FIBREUX	9
2.2.1	Teneur en eau dans toute la paroi	9
2.2.2	Teneur en eau dans le grès	10
2.2.3	Teneur en eau dans l'isolant	12
2.3	RESULTATS MULTIPOR	16
2.3.1	Teneur en eau dans toute la paroi	16
2.3.2	Teneur en eau dans le grès	17
2.3.3	Teneur en eau dans l'isolant	20
2.4	RESULTATS PSE	22
2.4.1	Teneur en eau dans toute la paroi	22
2.4.2	Teneur en eau dans le grès	23
2.5	RESULTATS RENOVATION SANS AMELIORATION THERMIQUE	26
2.6	SIMULATIONS REMONTEES CAPILLAIRES.....	28
2.6.1	Hypothèses.....	28
2.6.2	Résultats.....	29
3	DIMENSIONNEMENT - MAISON LUDWIGSWINKEL	31
3.1	SITUATION ETUDIEE	31
3.2	RESULTATS ISOLANTS FIBREUX	32
3.2.1	Interface Isolant / grès	32
3.2.2	Solive.....	34
3.3	RESULTATS MULTIPOR	36
3.3.1	Interface isolant / grès.....	36
3.3.2	Solive.....	38
4	CONCLUSION – MAISON LUDWIGSWINKEL.....	41

1 HYPOTHESES

1.1 MATERIAUX

○ Le mur – Hunspach :

Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Torchis	11	1000	1514	0,6
Bois (chêne)	140	1500	685	0,13
Enduit chaux	7	850	1600	0,7

○ Le mur – Ludwigswinkel :

Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Grès Obernkirchner	32	850	2150	2,3
Enduit chaux	7	850	1600	0,7

○ Les isolants :

Les isolants fibreux se comportent sensiblement de la même manière. Nous avons choisi un matériau aux caractéristiques moyennes (laine de lin).

De même, polystyrène expansé, extrudé et polyuréthane ont le même comportement hygrométrique. Les tests sur le polystyrène expansé permettent donc d'obtenir des conclusions pour ces trois matériaux.

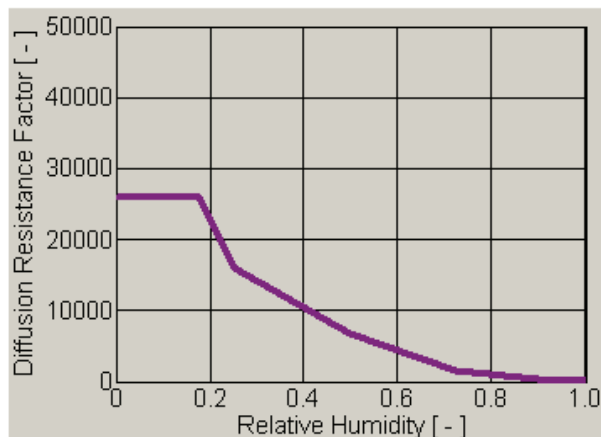
Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Multipor	4,1	850	115	0,04
Colle Multipor	15,1	850	833	0,155
Laine	1,5	1660	38	0,036
Polystyrène expansé	21,7	1500	20	0,04

Pour les tests avec le Multipor et le PSE, on a pris en compte une couche de colle de 6 mm entre l'isolant et le mur.

○ Pare-vapeur et freine-vapeur :

Composition paroi	Sd (m)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Pare-vapeur	50	2300	130	2,3
Pare-vapeur non jointif (simulé par le pare-vapeur précédent avec un trou de 1mm)				
Freine-vapeur	4	2300	130	2,3
Pare-vapeur hygrovariable	0 à 26	2500	115	2,4

Le pare-vapeur de type Intello a une résistance à la vapeur qui varie avec l'humidité relative de l'air environnant. Sur le graphique ci-dessous est représenté le facteur de résistance à la diffusion de vapeur du pare-vapeur intelligent. Dans nos simulations, on introduit ce matériau sous la forme d'une couche d'1 mm, ainsi on obtient un Sd variant de 26 (26000 * 1 mm) à 0.



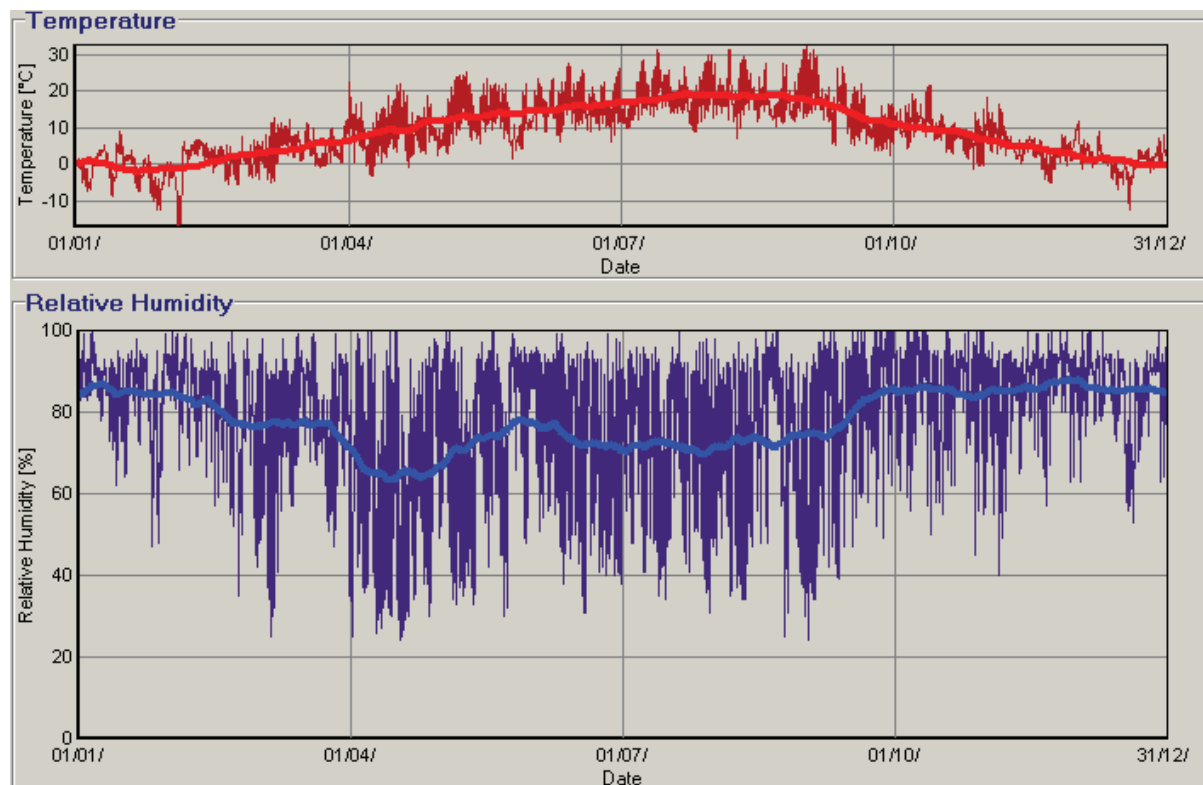
1.2 CONDITIONS INITIALES

Nous avons fixé une valeur initiale en eau telle que les matériaux soient en équilibre avec un air à 20°C et ayant une humidité relative de 80%. Ces conditions initiales sont défavorables et permettent de vérifier si les matériaux s'assèchent ou non au fil du temps.

1.3 CLIMAT EXTERIEUR

Le logiciel WUFI est d'origine allemande, la base de données météorologique concerne uniquement des villes allemandes. Nous avons choisi Würzburg comme climat extérieur de référence dont la latitude est voisine de celle de Strasbourg. Ce climat présente également un comportement pluviométrique moyen.

1.3.1 TEMPERATURE ET HUMIDITE RELATIVE

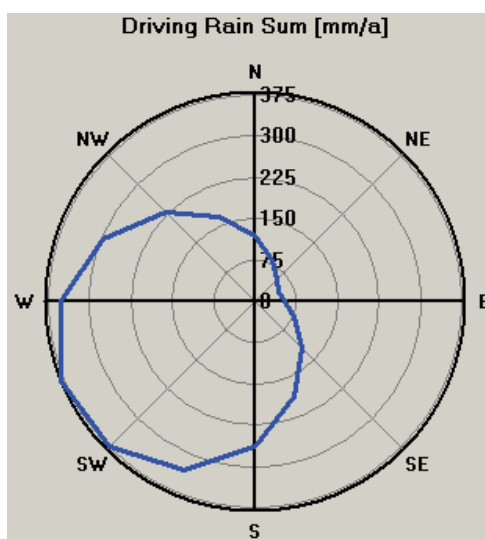


Le climat de Würzburg, lors de l'année de référence de 1991 a les caractéristiques suivantes :

	Température [°C]	Humidité relative [%]
Maximum	32,6	100
Minimum	-16,9	24
Moyenne	9	78

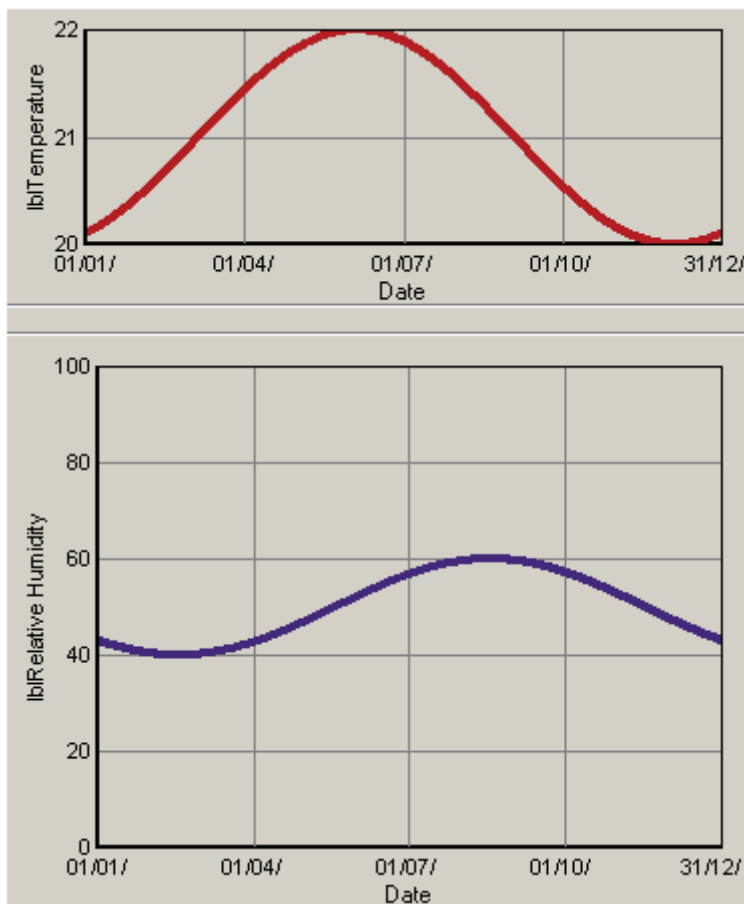
1.3.2 PLUVIOMETRIE

Le graphique ci-dessous représente la quantité de pluie reçue par orientation. L'orientation Ouest reçoit la quantité de pluie maximum. Nous avons pris comme hypothèse pour la suite une orientation Nord-Ouest de la portion de mur étudiée, afin de se placer dans le cas le plus défavorable à la fois du point de vue de la pluie (Ouest) et du rayonnement solaire (Nord).



1.4 CLIMAT INTERIEUR

Pour l'air intérieur, nous avons choisi les recommandations WTA¹ (Association scientifique et technique pour la préservation du patrimoine bâti). Cela correspond à un profil sinusoïdal pour la température intérieure, comprise entre 20°C en hiver et 22,5°C en été, et pour l'humidité relative, qui oscille entre 40 et 60% au cours de l'année.



¹ Wissenschaft- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege

1.5 CRITERES D'INTERPRETATION

- **Evolution de la quantité d'eau dans toute la paroi**

Pour s'assurer de la pérennité des composants d'une paroi, la teneur en eau dans la paroi globale doit se stabiliser au fil des ans. Ainsi on saura si la paroi accumule de l'eau au fil des années ou si au contraire elle évacue l'eau qu'elle contient et parvient chaque année à sécher.

- **Teneur en eau dans les matériaux**

Les valeurs seuils considérées sont issues de différentes sources, dont la note technique d'Enertech et le livre « L'isolation thermique écologique » de Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey.

	Critères - valeurs seuils
Matériau	% de la masse sèche
Bois	20% de la masse sèche
Multipor	23% de la masse sèche
Laine minérale	13% de la masse sèche
Laine de bois	18% de la masse sèche
Cellulose	15% de la masse sèche
Laine de mouton	30% de la masse sèche

2 TESTS DES MATERIAUX - MAISON LUDWIGSWINKEL

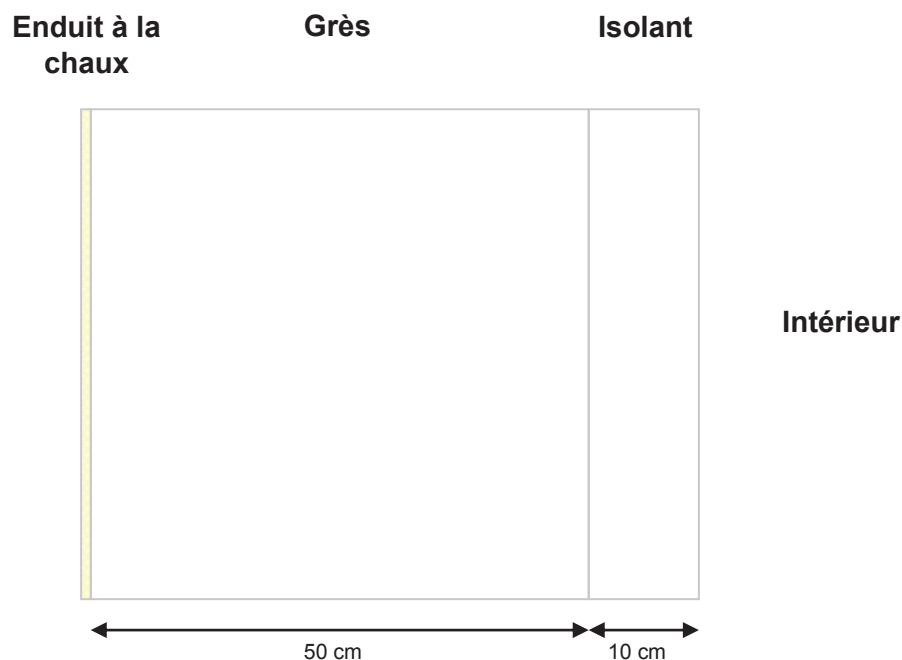
2.1 PORTION DE MUR ETUDIEE

Dans cette partie, nous présentons les tests effectués en mur courant avec différents matériaux en isolation intérieure. Ainsi on sera en mesure de dégager les matériaux envisageables en isolation intérieure, en fonction de leur comportement hygrométrique.

Les tests d'isolation intérieure effectués sont :

- Isolants fibreux avec :
 - o Pare-vapeur d'un Sd de 50 m, posé parfaitement
 - o Pare-vapeur d'un Sd de 50 m, posé de façon imparfaite : trou d'1 mm
 - o Frein-vapeur d'un Sd de 4 m
 - o Pare-vapeur hygrovariable
- Multipor ou générique de même type (béton cellulaire ou panneaux de silicate de chaux)
- Polystyrène expansé

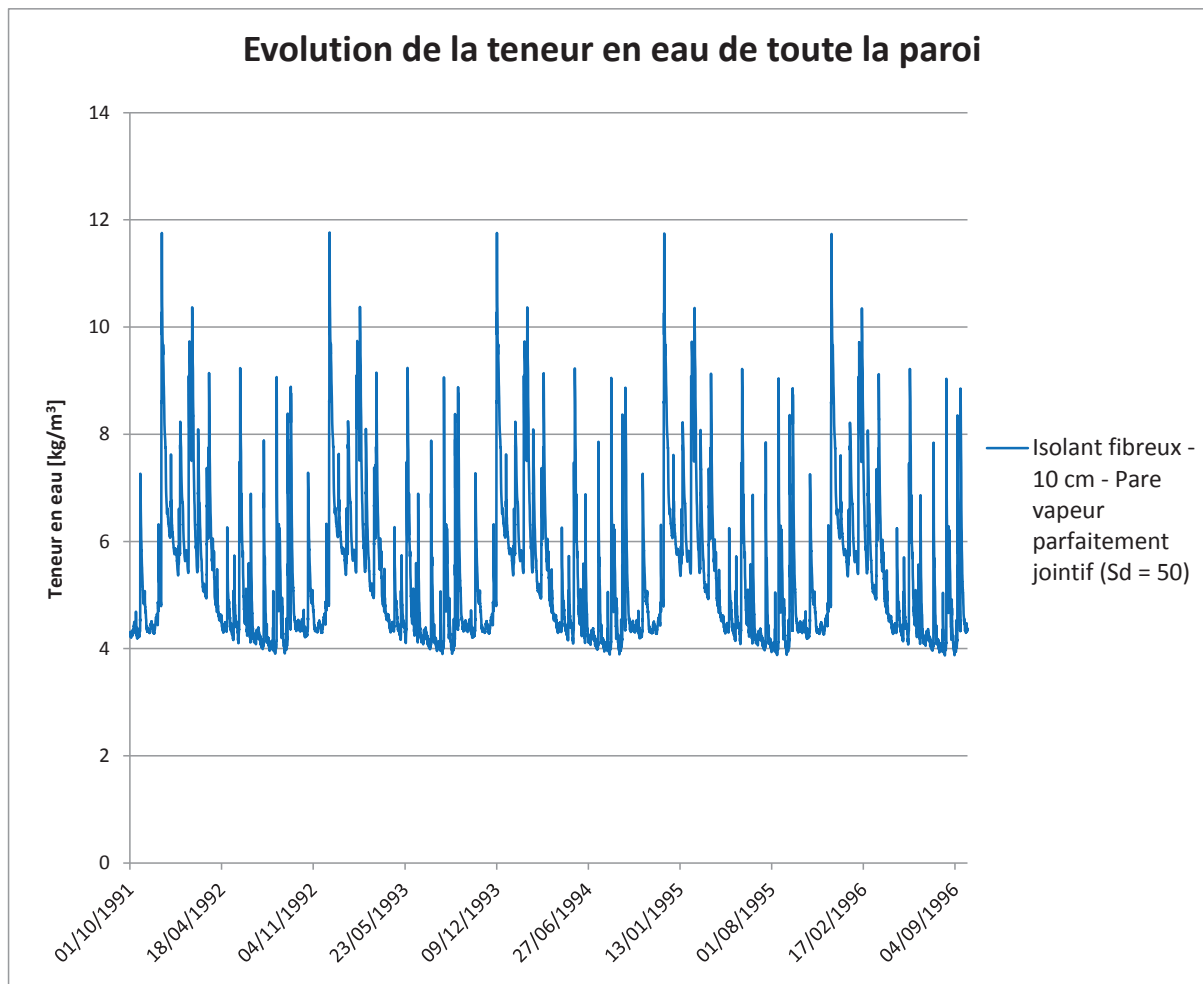
Nous avons considéré une portion de mur courant, orientée NO. Ainsi nous nous plaçons dans le cas le plus défavorable. En effet une paroi orientée NO met plus de temps à s'assécher en été (maximum de pluie à l'ouest et minimum de rayonnement solaire au Nord).



2.2 RESULTATS ISOLANT FIBREUX

2.2.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations sur 5 ans. On obtient ci-dessous l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi, sur 5 ans :

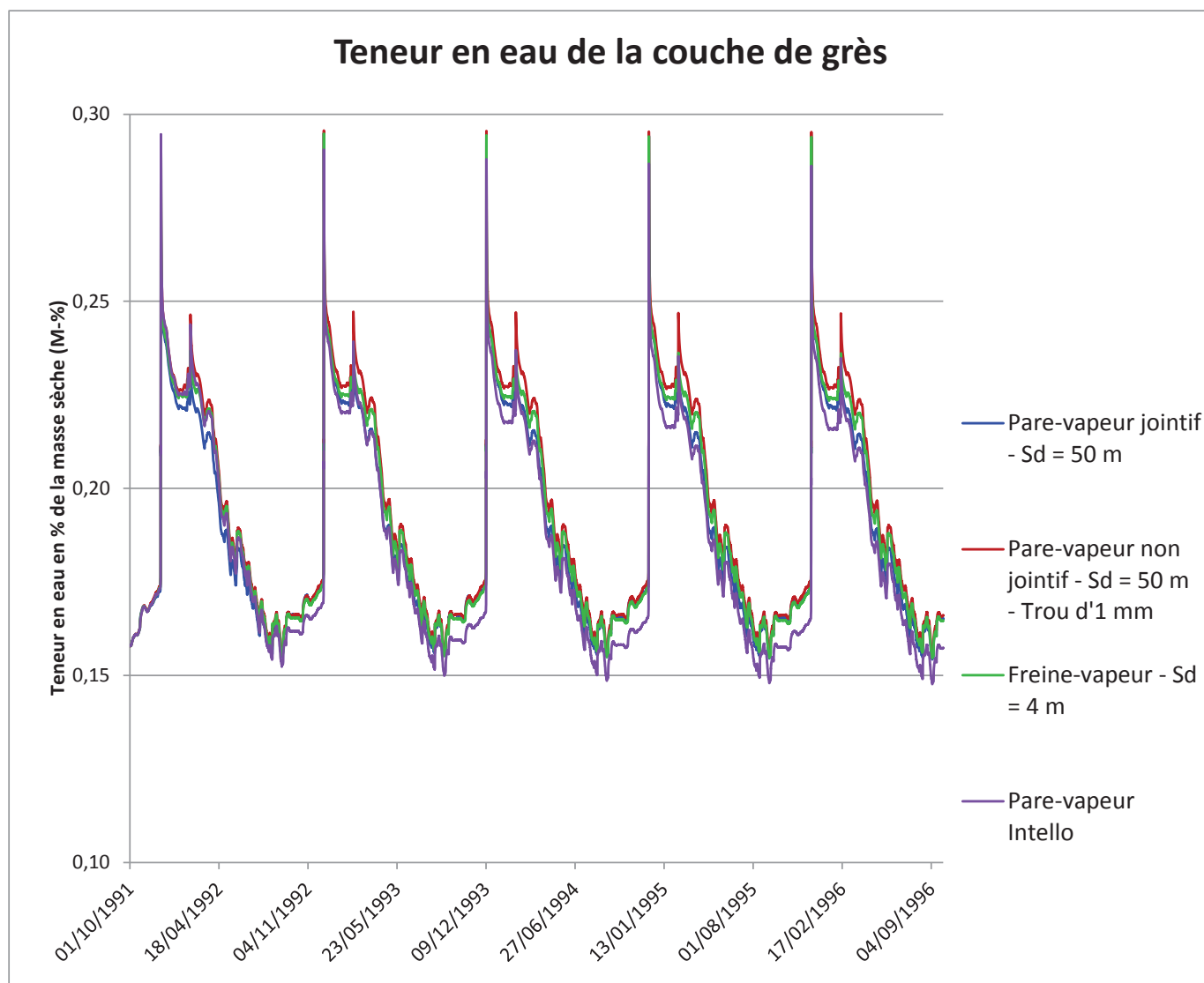


La teneur en eau de toute la paroi reste stable, le mur ne se gorge pas d'eau d'une année à l'autre.

Voyons ce qu'il se passe dans l'épaisseur de la couche de grès.

2.2.2 TENEUR EN EAU DANS LE GRES

Nous étudions la teneur en eau de toute l'épaisseur de grès, comme hachuré sur le schéma ci-dessous.



Nous ne disposons pas de valeur seuil claire de la teneur en eau qui permette de statuer sur une possible dégradation du grès.

En revanche on observe que les quantités d'eau dans le grès restent très faibles (en dessous de 0,3% de la masse sèche de grès). De plus, l'eau ne s'accumule pas d'année en année mais sèche bien périodiquement.

Nous nous intéressons maintenant au comportement de l'isolant.

2.2.3 TENEUR EN EAU DANS L'ISOLANT

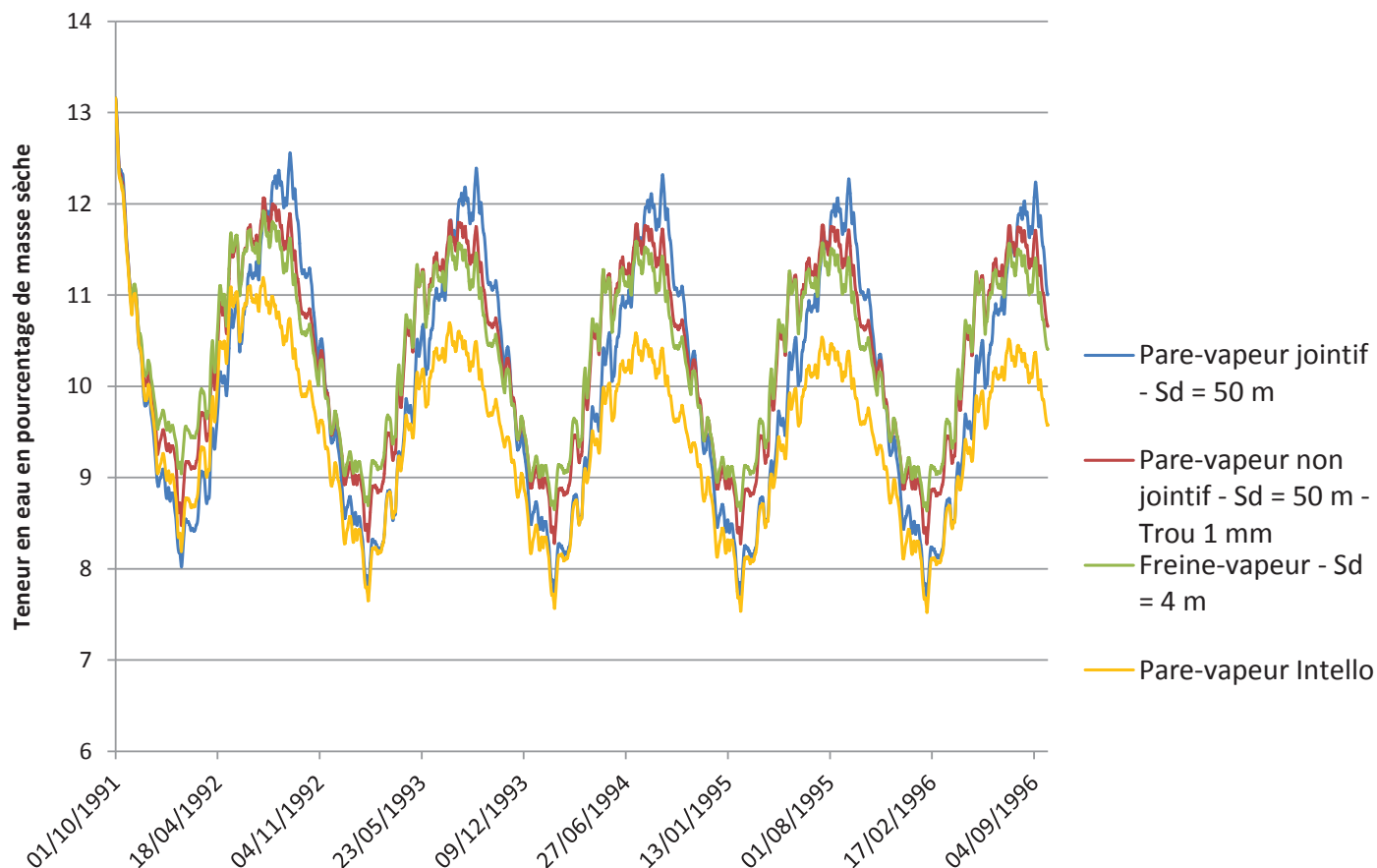
2.2.3.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA COUCHE D'ISOLANT

La zone dont on étudie l'évolution hygrométrique est mise en évidence en rouge dans le schéma ci-dessous :



Le graphique suivant présente l'évolution de la teneur en eau dans toute la couche d'isolant, et ce pour les 4 configurations de pare ou freine vapeur.

Isolant Laine

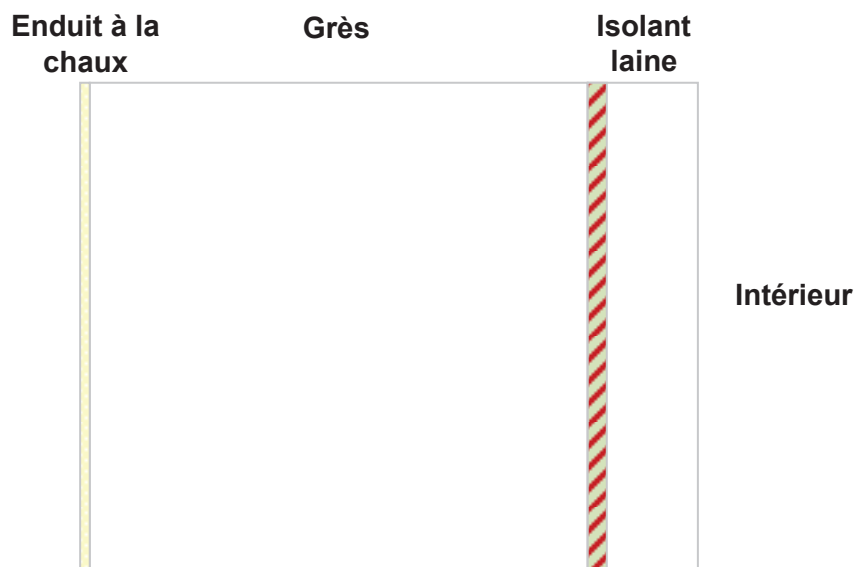


- Au global de la couche d'isolant, c'est avec le pare-vapeur hygrovariable qu'on obtient les quantités d'eau les moins élevées.
- Aucune des valeurs seuils n'est dépassée (13% de la masse sèche pour la laine minérale, 15% pour la cellulose, 18% pour la laine de bois et 30% pour la laine de mouton).

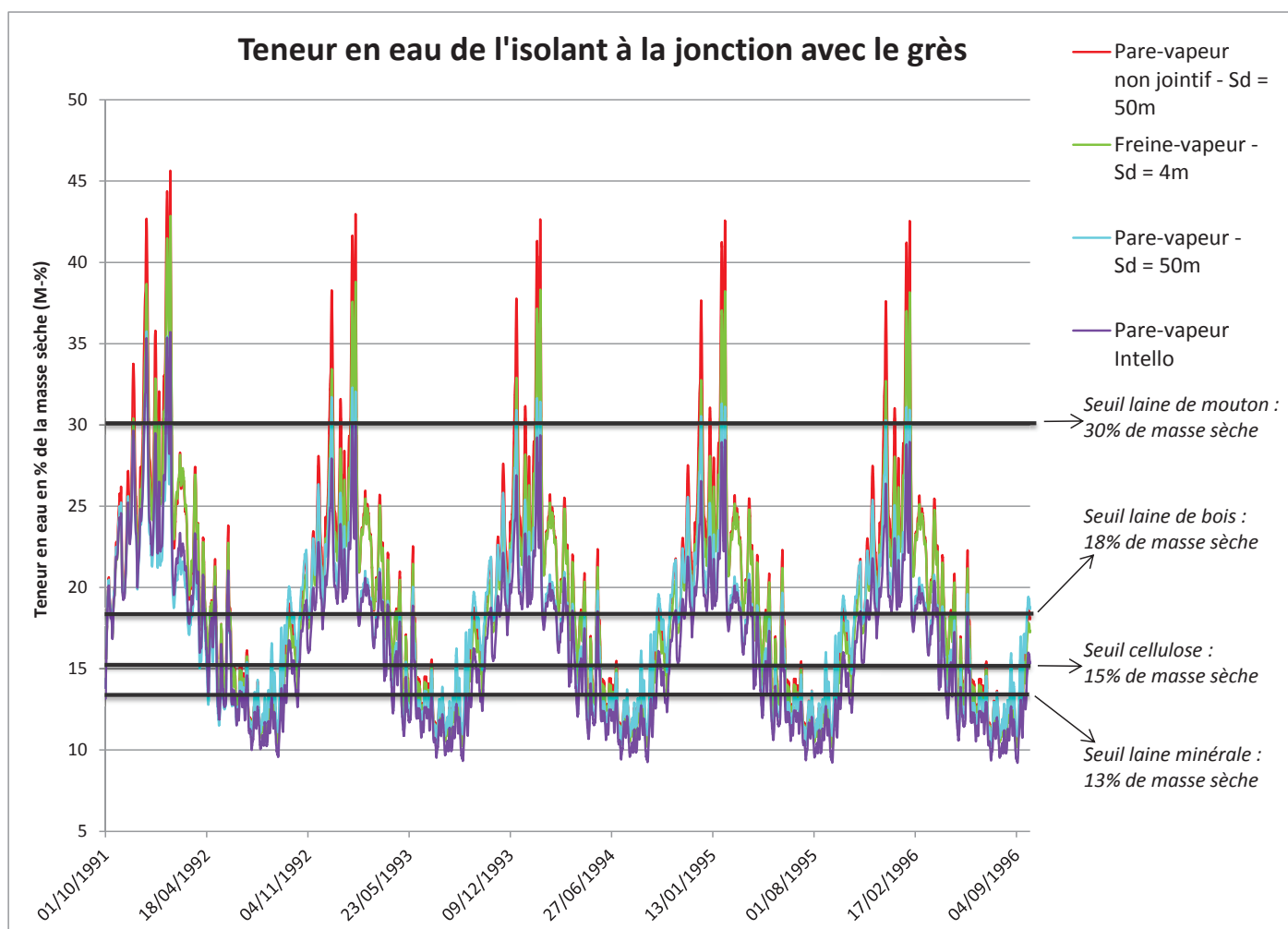
Il ne faut pas oublier de regarder plus en détail la teneur en eau de la couche limite d'isolant à l'interface avec le grès (1 à 2 cm). En effet, ce qui se passe dans cette zone à risques est déterminant pour la pérennité de l'isolant fibreux.

2.2.3.2 TENEUR EN EAU DANS LA COUCHE LIMITE D'ISOLANT A L'INTERFACE AVEC LE GRES

La couche limite d'isolant dont on étudie l'évolution des propriétés hygrométriques est mise en évidence en rouge sur le schéma ci-dessous :



Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la teneur en eau de la couche limite de l'isolant, et ce pour les 4 configurations de pare ou freine vapeur.



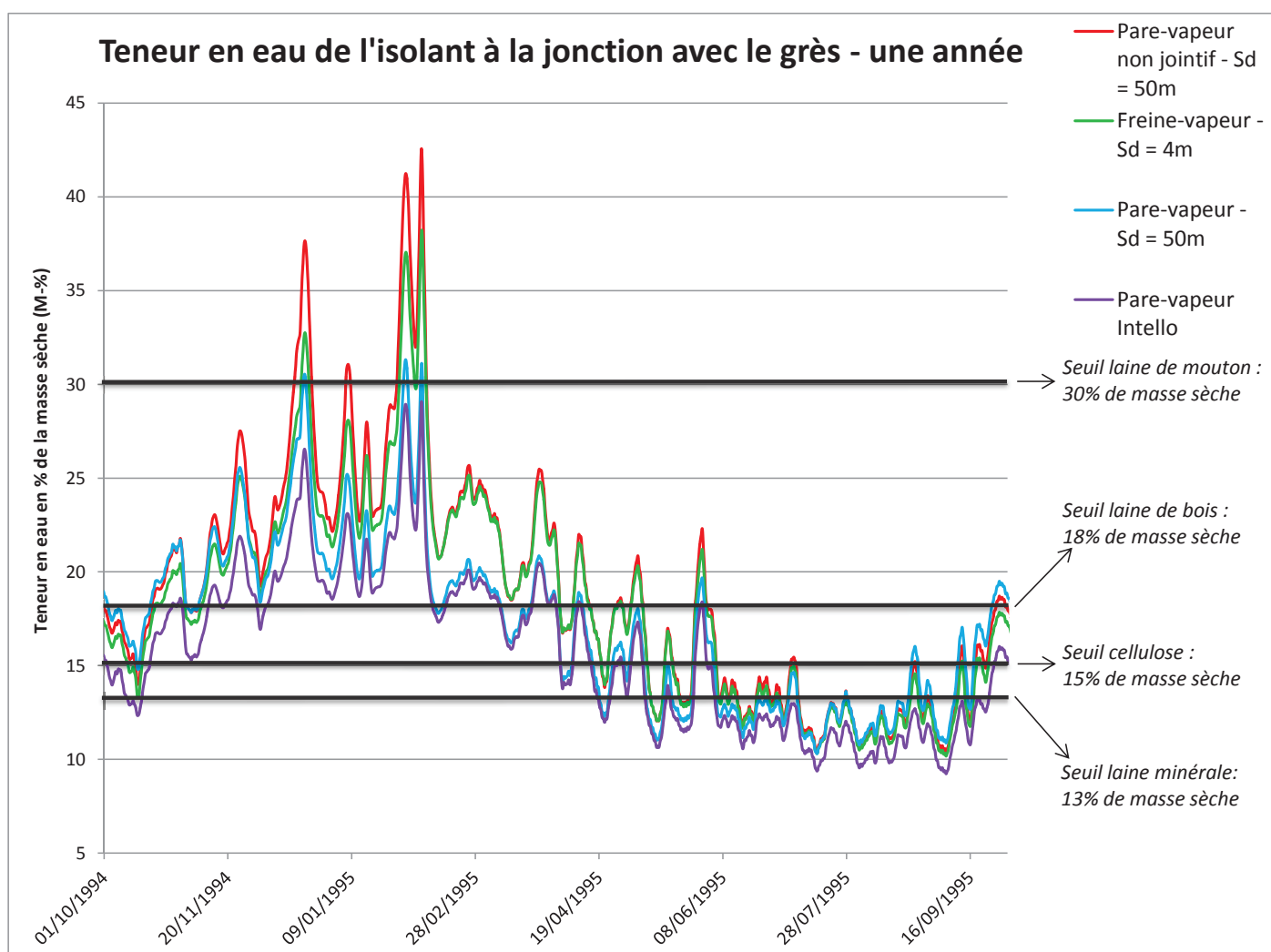
- Quelle que soit la configuration de pare ou freine vapeur mise en œuvre, les valeurs seuils de la laine minérale, de la cellulose et de la laine de bois sont atteintes tous les ans.

La laine de mouton paraît être l'isolant fibreux à privilégier.

- La limite de teneur en eau pour la laine de mouton est dépassée pour les configurations avec pare-vapeur et freine-vapeur traditionnels, mais pas avec un pare-vapeur hygrovariable.

La configuration avec pare-vapeur hygrovariable apporte les meilleurs résultats.

Le graphique ci-dessous présente un zoom sur un an des courbes précédentes.



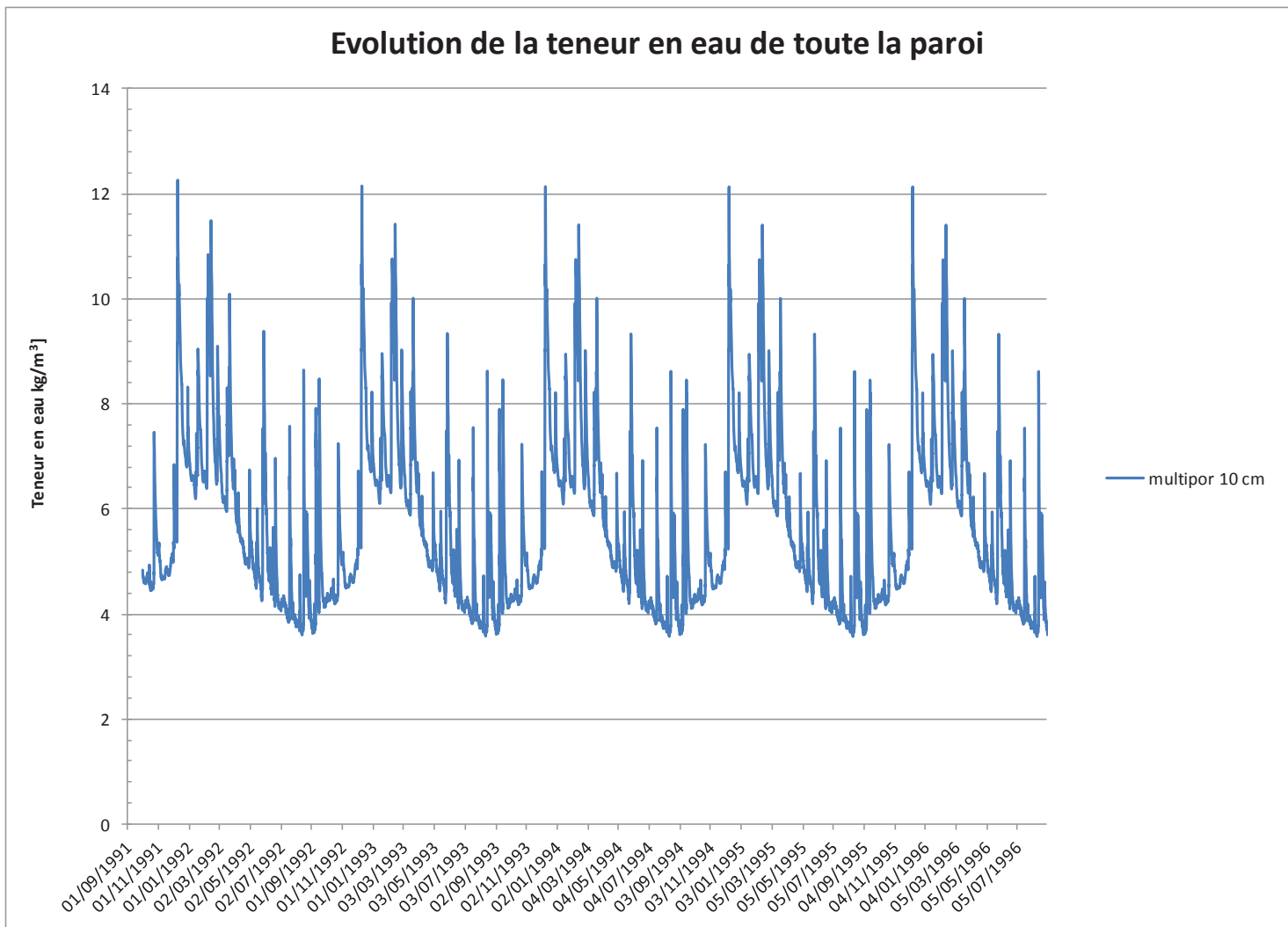
- Selon la configuration de pare ou freine vapeur mise en œuvre, les valeurs seuils de teneur en eau pour la laine minérale et la cellulose sont dépassées au moins 6 mois d'affilée (configuration pare vapeur hygrovariable) voire plus (autres configurations). Cela constitue un risque pour la pérennité de l'isolant.
- De même, le seuil de teneur en eau de la laine de bois est atteint pendant 3 mois consécutifs avec le pare-vapeur hygrovariable et 5 mois avec les autres configurations. La pérennité du matériau peut être menacée.
- En revanche, la quantité d'eau maximale de la laine de mouton n'est dépassée que très ponctuellement :
 - 2 jours consécutifs maximum dans la configuration avec pare-vapeur classique
 - 4 jours consécutifs maximum avec un pare-vapeur non jointif ou un freine-vapeur

La laine de mouton paraît être l'isolant fibreux le plus pérenne.

2.3 RESULTATS MULTIPOR

2.3.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations avec 10 cm de Multipor fixé au grès grâce à des plots de colle de 5 mm d'épaisseur (10 cm de colle tous les 20 cm). On obtient ci-dessous l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi, sur 5 ans :

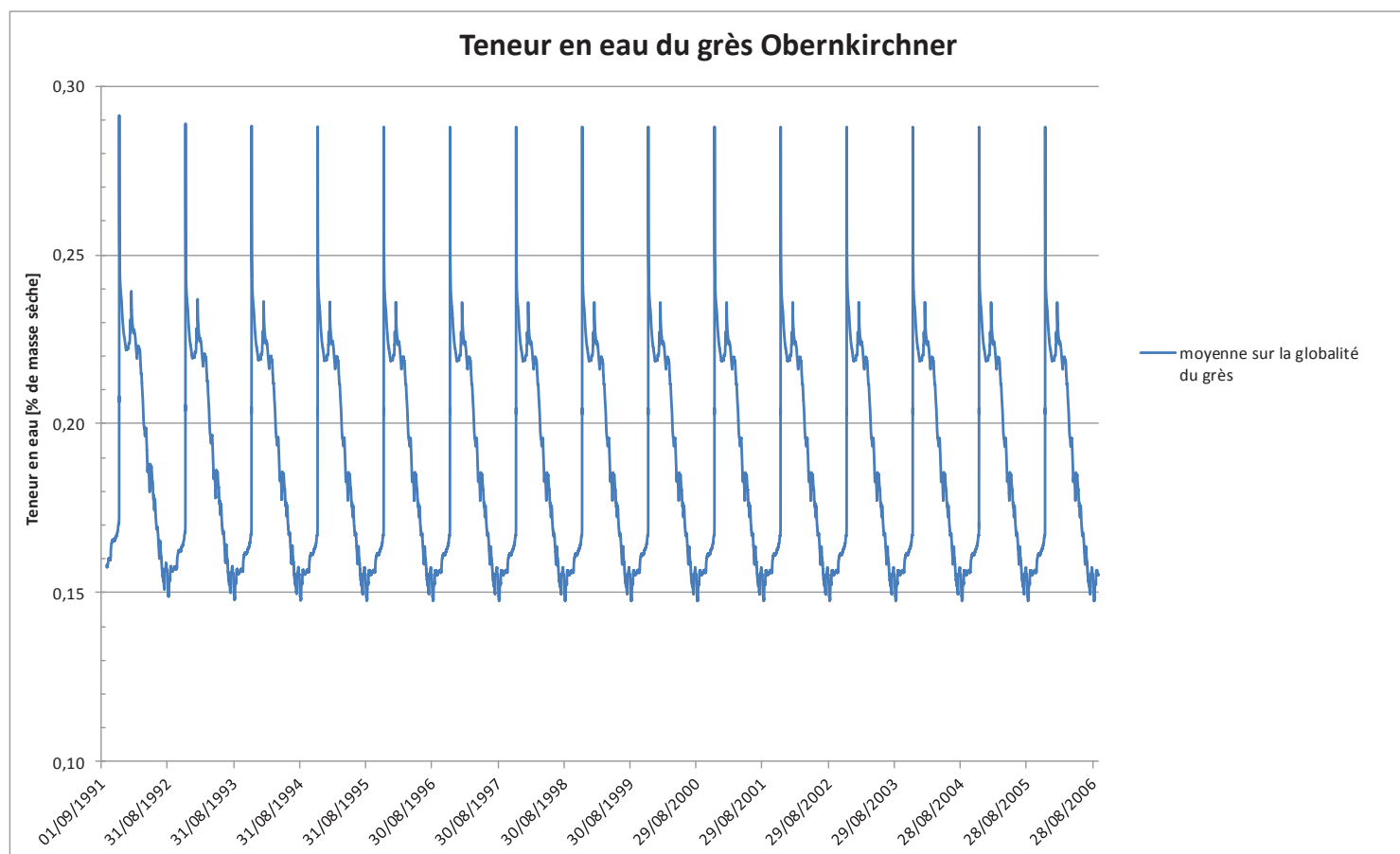


La quantité d'eau dans la paroi reste stable, l'eau ne s'accumule pas d'année en année.

2.3.2 TENEUR EN EAU DANS LE GRES

2.3.2.1 DANS LA TOTALITE DU GRES

On s'intéresse à la teneur en eau dans la globalité du grès comme montré ci-dessous :



Il n'y a pas de seuil de la teneur en eau clairement défini pour le grès, qui indiquerait un risque pour sa pérennité.

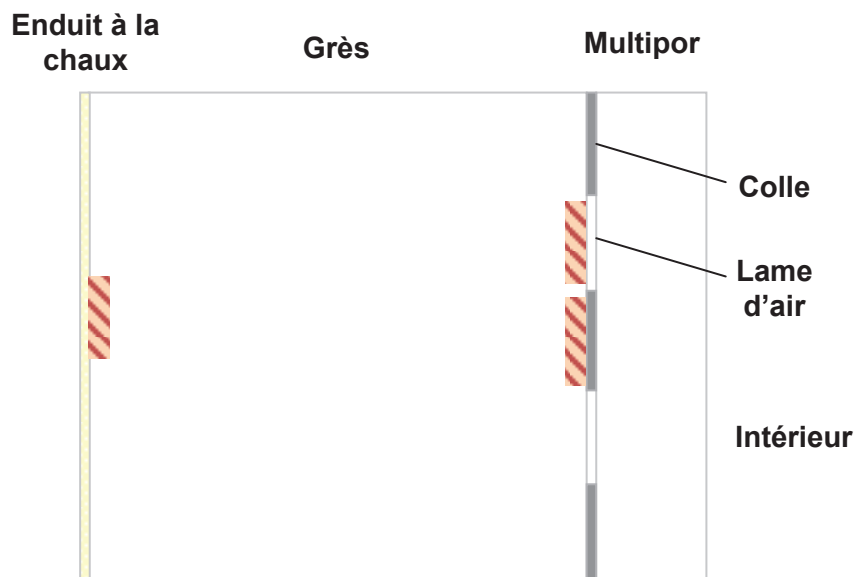
Cependant on voit que la teneur en eau reste en équilibre périodique (les variations de la teneur en eau se répètent d'une année sur l'autre). De plus, les quantités d'eau sont très faibles (moins de 0,3% de la masse sèche du grès).

2.3.2.2 DANS LES COUCHES LIMITES DU GRES

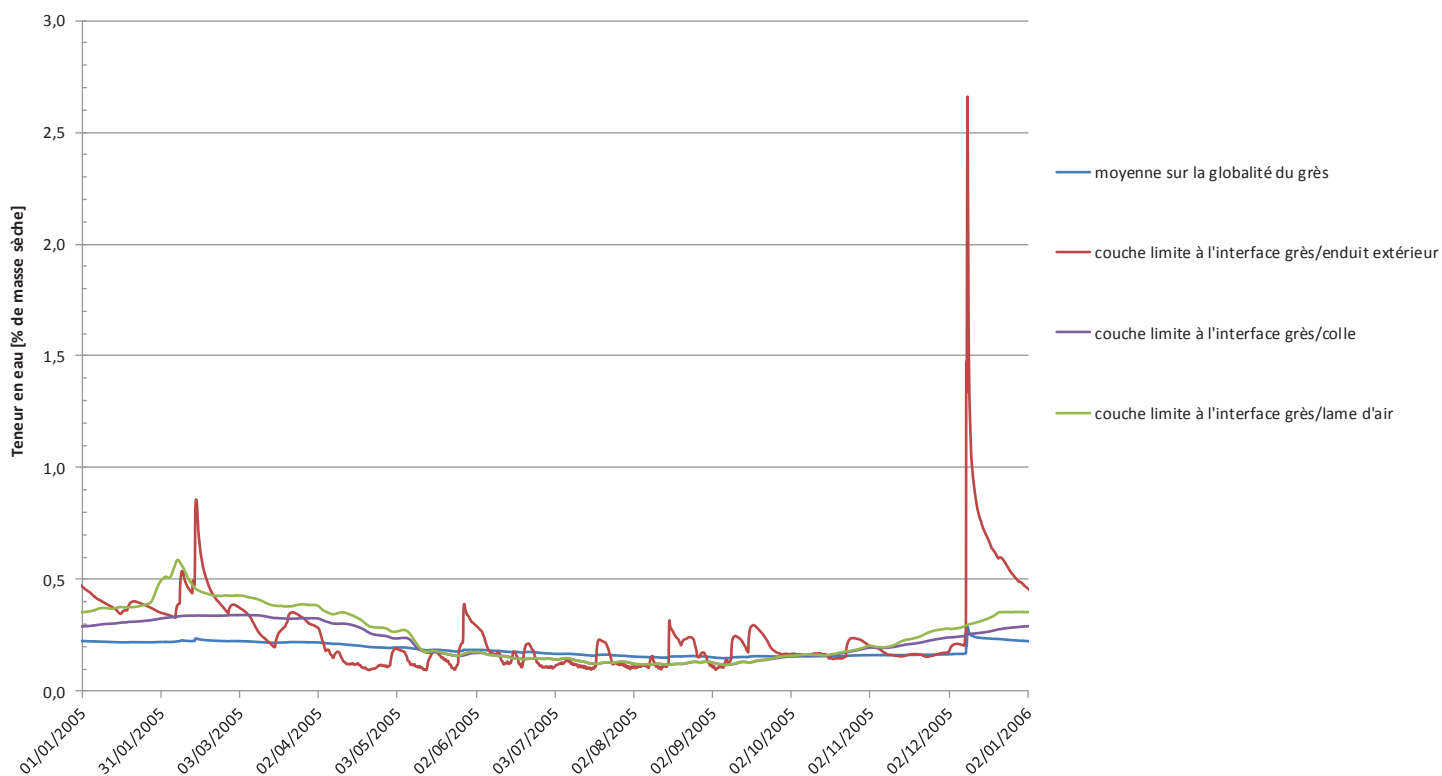
Selon différentes études, les lames d'air entre les plots de colle représentent des zones à risques du point de vue hygrométrique. En effet, la lame d'air constitue une résistance thermique importante ($\lambda = 0,047$), ce qui a pour conséquence de mettre le grès dans une situation de paroi froide. En revanche la lame d'air est perméable à la vapeur d'eau ($\mu = 0,79$). Il y a donc un risque accru que cette vapeur d'eau condense au contact du grès.

Intéressons-nous en détail à l'évolution de la teneur en eau dans le grès sur une année. Et ce pour les zones suivantes :

- Couche limite (1 ou 2 cm d'épaisseur) à l'interface grès/enduit extérieur
- Couche limite à l'interface grès/colle
- Couche limite à l'interface grès/lame d'air



Teneur en eau du grès Obernkirchner sur 1 an



Il n'y a pas de seuil de la teneur en eau clairement défini pour le grès, qui indiquerait un risque pour sa pérennité.

Cependant, on remarque de nouveau que la paroi a en moyenne une faible teneur en eau devant sa masse sèche (entre 0,15 et 0,3%).

La partie du grès la plus à l'extérieur (en contact avec l'enduit extérieur) subit des variations notables suivant les conditions climatiques extérieures. On remarque surtout un pic lors du mois de décembre.

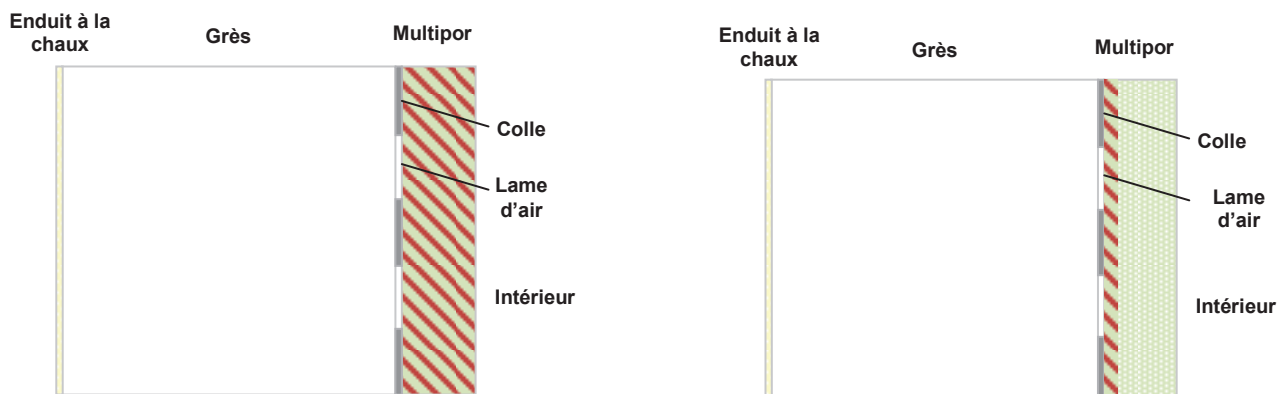
Il peut y avoir un risque de dégradation des surfaces extérieures notamment lors des phases de gel/dégel de l'eau contenue dans le grès, étant donné que cette zone est la plus froide du mur.

Malgré le pic d'eau dans la couche limite à l'interface grès/enduit extérieur, l'utilisation d'un enduit extérieur à base de chaux, perméable à la vapeur d'eau, permet à cette partie de grès de sécher presque aussitôt et de manière importante.

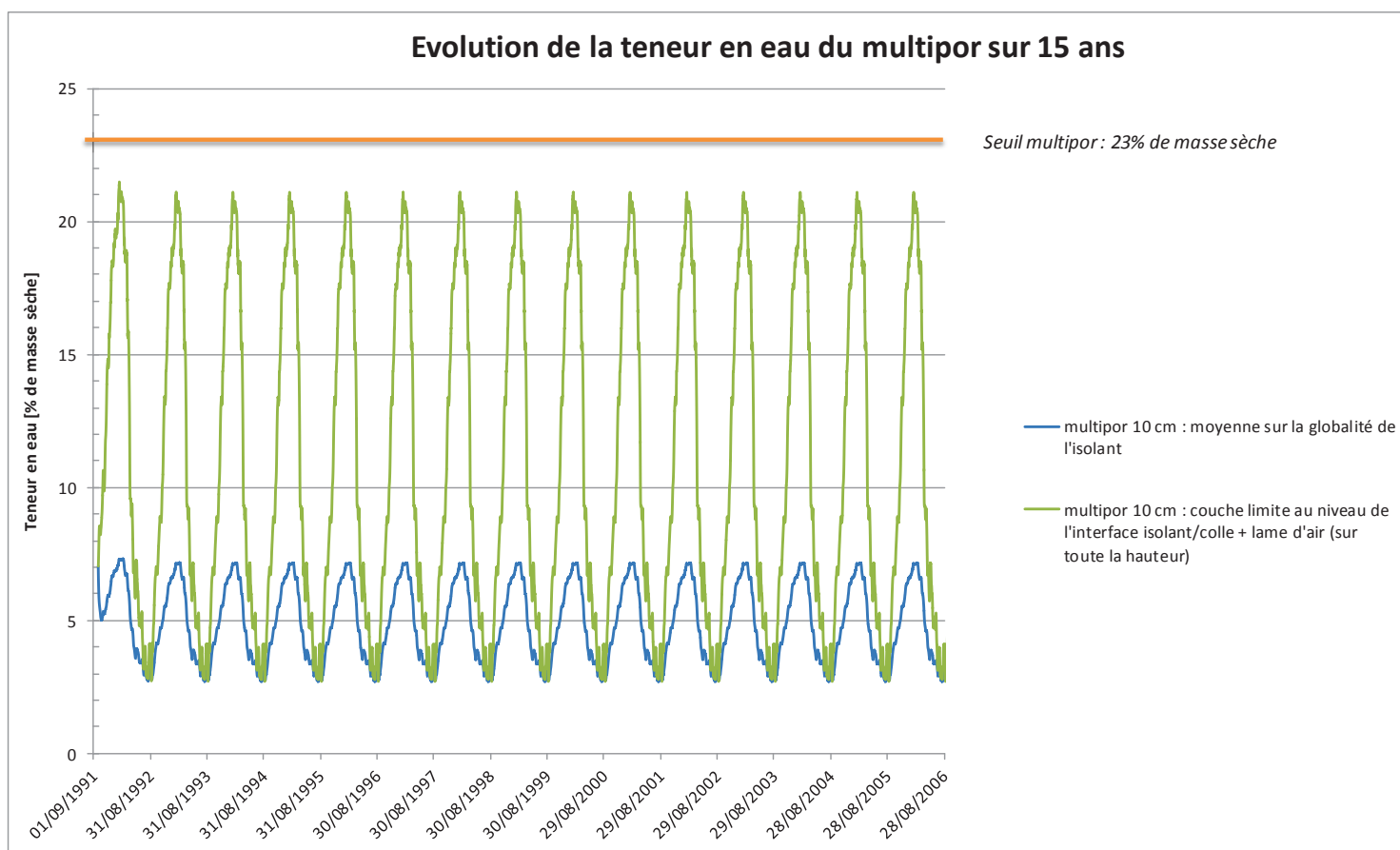
Concernant la couche limite du grès à l'interface avec les lames d'air, elle a une teneur en eau plus élevée que celle à l'interface grès/colle (conformément aux suppositions faites au début de ce paragraphe). Même si ces quantités d'eau restent faibles, **il est préférable d'un point de vue hygrométrique d'étaler la colle de manière uniforme au lieu de fixer l'isolant par des plots de colle.**

2.3.3 TENEUR EN EAU DANS L'ISOLANT

On considère la globalité du Multipor, ainsi que la couche limite à l'interface grès/colle + lame d'air.



La teneur en eau évolue de la manière suivante :



On constate que les conditions initiales choisies (80% d'humidité relative soit une teneur en eau de 7% de masse sèche du Multipor) sont assez proche de l'équilibre périodique puisque la teneur en eau se stabilise très rapidement.

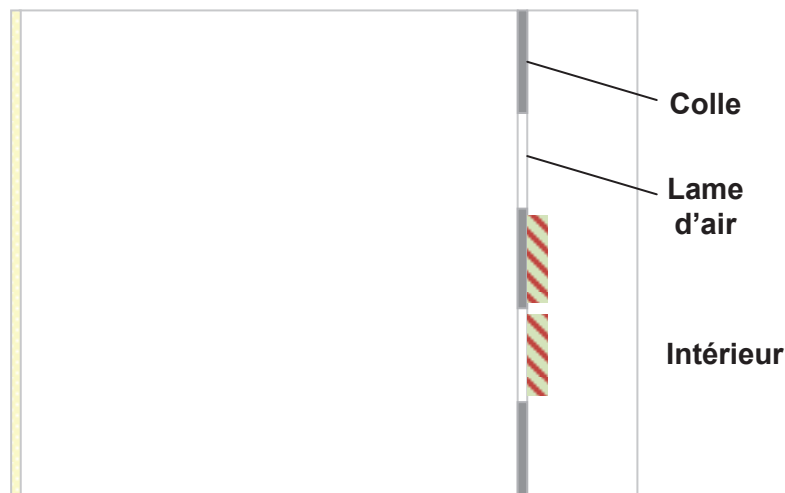
On s'intéresse en détail à l'évolution de la teneur en eau dans le Multipor sur une année. Et ce pour les zones suivantes :

- Couche limite à l'interface Multipor/colle
- Couche limite à l'interface Multipor/lame d'air
- Couche limite à l'interface Multipor/colle + lame d'air

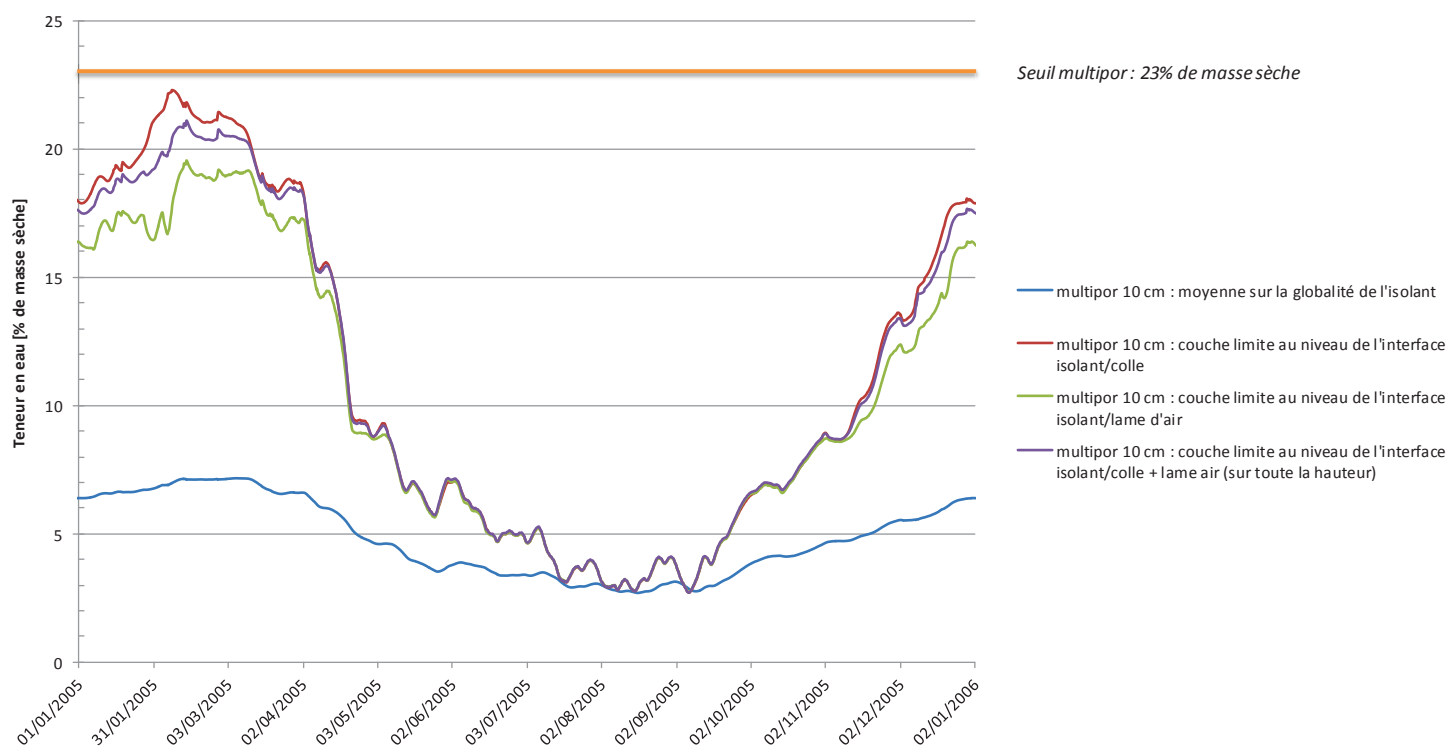
**Enduit à la
chaux**

Grès

Multipor



Evolution de la teneur en eau du multipor sur une année



Même dans les zones avec un risque théorique élevé de condensation (les interfaces avec la colle ou les lames d'air), la teneur en eau du Multipor est inférieure au seuil de 23% de masse sèche.

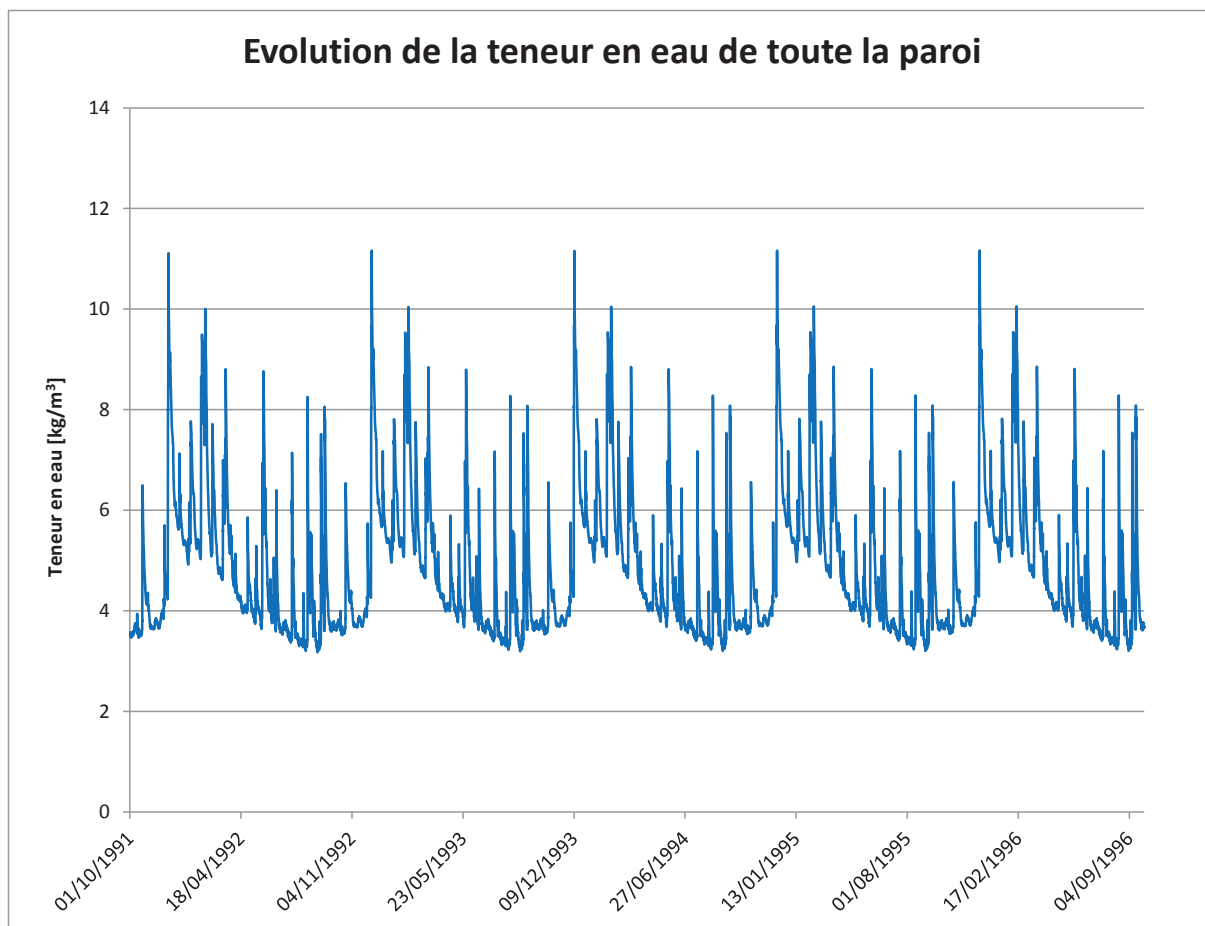
A contrario avec les couches limites du grès, la couche limite à l'interface Multipor/colle contient plus d'eau (en hiver) que celle à l'interface Multipor/air. En effet, en hiver, la vapeur d'eau migre de l'intérieur vers l'extérieur. L'air est plus perméable à la vapeur d'eau que la colle, l'eau y est donc moins « bloquée » à l'interface.

Le Multipor est donc une solution tout à fait pérenne dans le cas de l'isolation par l'intérieur d'un mur en grès.

2.4 RESULTATS PSE

2.4.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations sur 5 ans, avec 10 cm d'isolation en polystyrène expansé fixé au grès grâce à des plots de colle de 5 mm d'épaisseur (10 cm de colle tous les 20 cm). On obtient ci-dessous l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi, sur 5 ans :



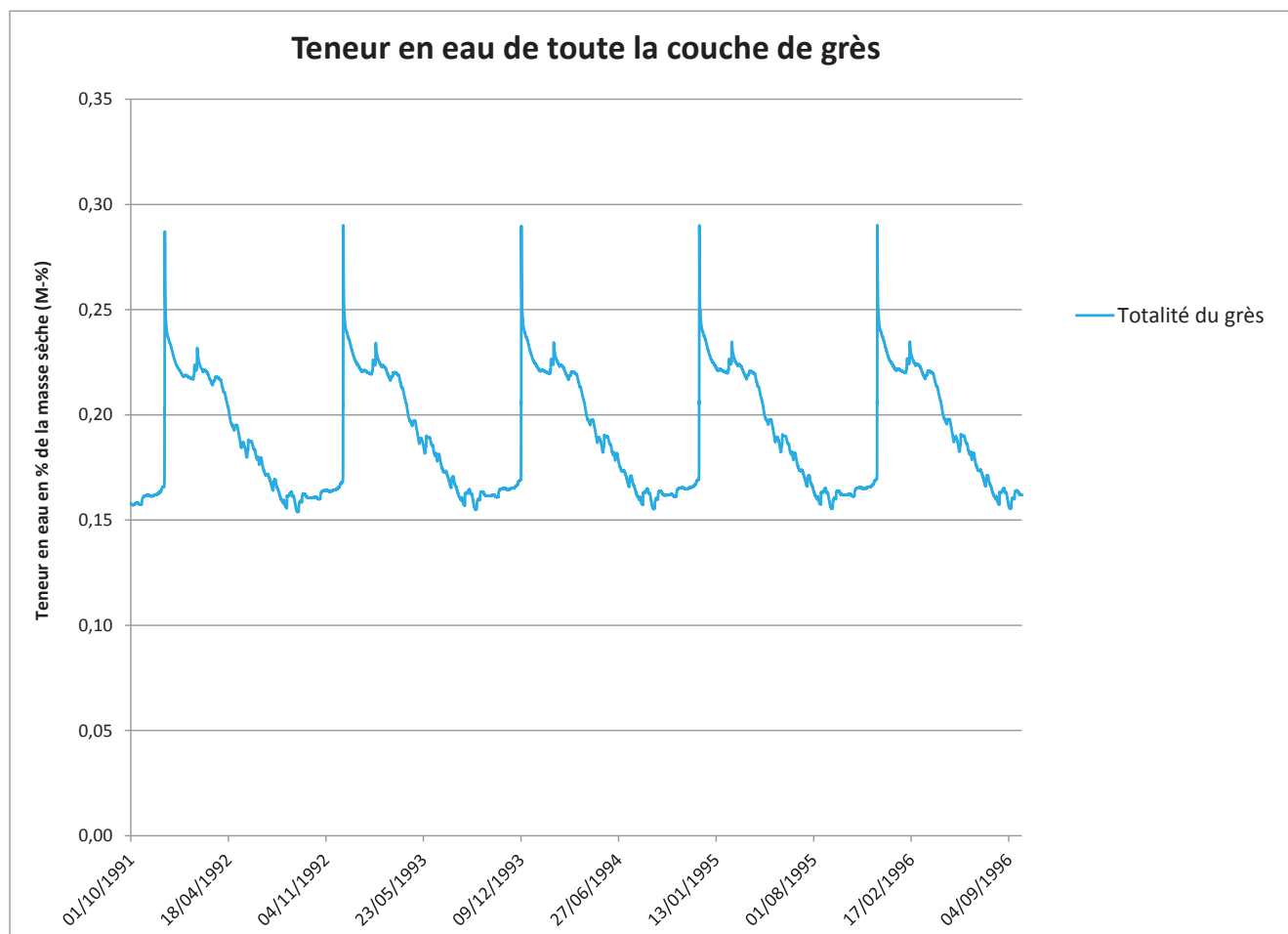
La quantité d'eau dans la paroi reste stable, l'eau ne s'accumule pas d'année en année.

Le polystyrène est un matériau non hygroscopique : il n'a pas la propriété de fixer une certaine quantité de l'humidité contenue dans l'air ou d'eau liquide à son contact. La teneur en eau du polystyrène ne nous aidera en rien pour nos conclusions, ce n'est donc pas un critère déterminant. Nous devons regarder ce qu'il se passe dans le grès.

2.4.2 TENEUR EN EAU DANS LE GRES

2.4.2.1 TENEUR EN EAU DANS LA TOTALITE DU GRES

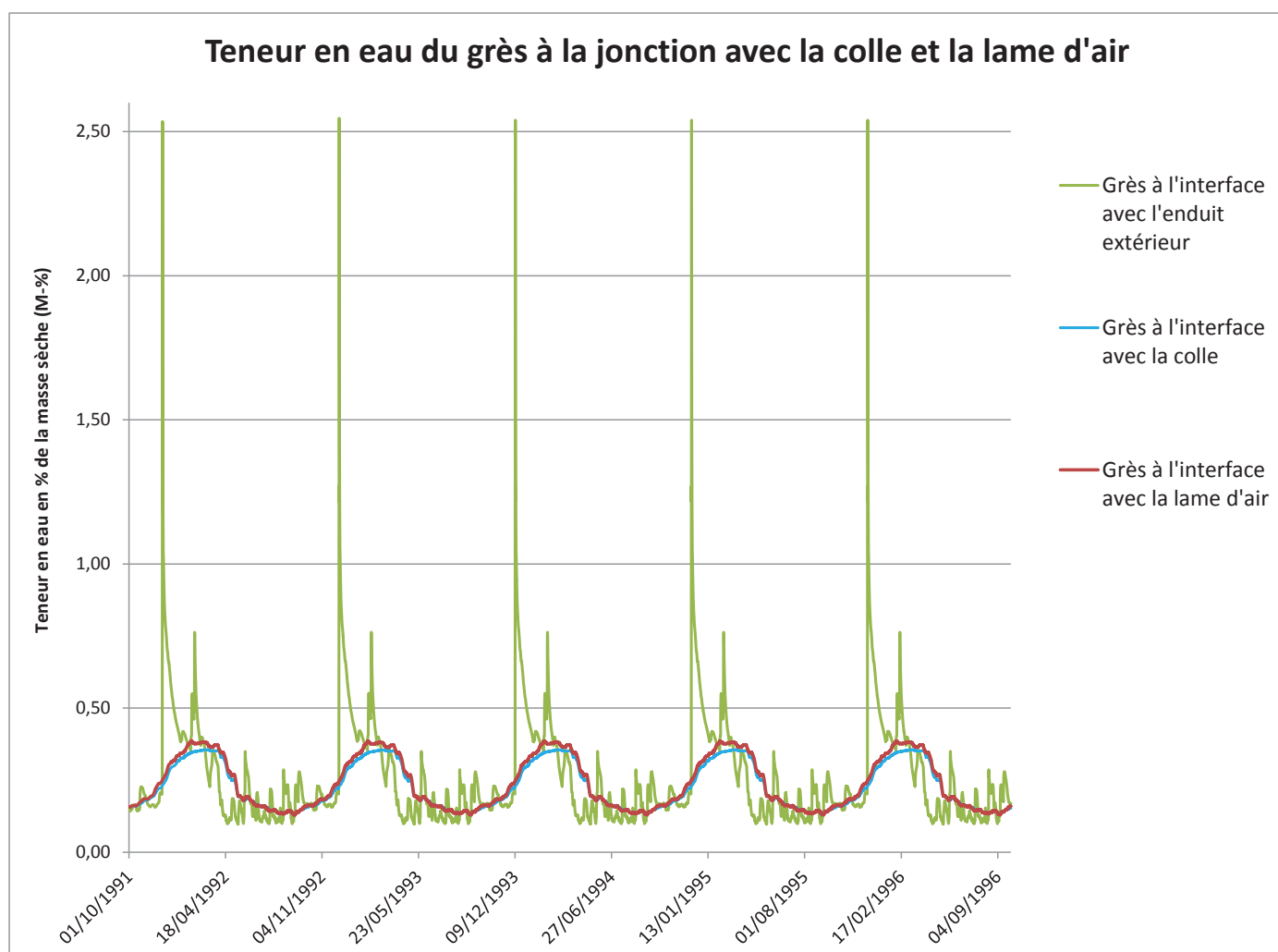
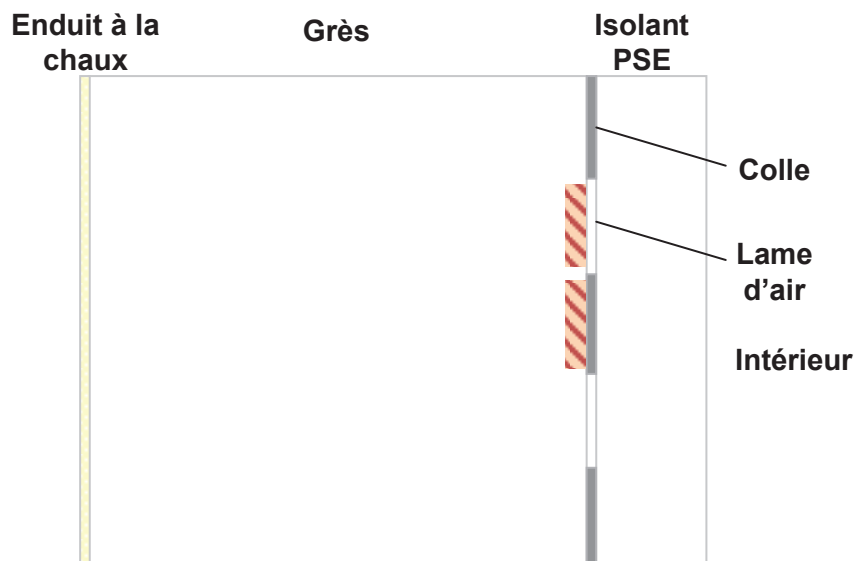
On regarde tout d'abord l'évolution de la quantité d'eau dans toute la couche de grès, comme indiqué en hachuré sur le schéma ci-dessous.



Le comportement de la couche de grès avec PSE en isolation intérieure est très similaire à celui du grès avec Multipor en isolation intérieure. Les quantités d'eau restent faibles et l'eau ne s'accumule pas d'année en année dans le grès.

2.4.2.2 TENEUR EN EAU DANS LA COUCHE LIMITE DE GRES A L'INTERFACE AVEC LA COLLE ET UNE LAME D'AIR

On regarde maintenant ce qu'il se passe d'une part dans la couche limite (2 cm) de grès à l'interface avec la colle et d'autre part dans la couche limite de grès à l'interface avec une lame d'air. Ces deux zones sont hachurées en rouge dans le schéma ci-dessous.



On retrouve les mêmes comportements que dans le cas du Multipor en isolant intérieur :

- La quantité d'eau à l'interface avec la lame d'air est plus importante qu'à l'interface avec la colle. Cela est dû à la conductivité thermique de l'air plus faible que celle

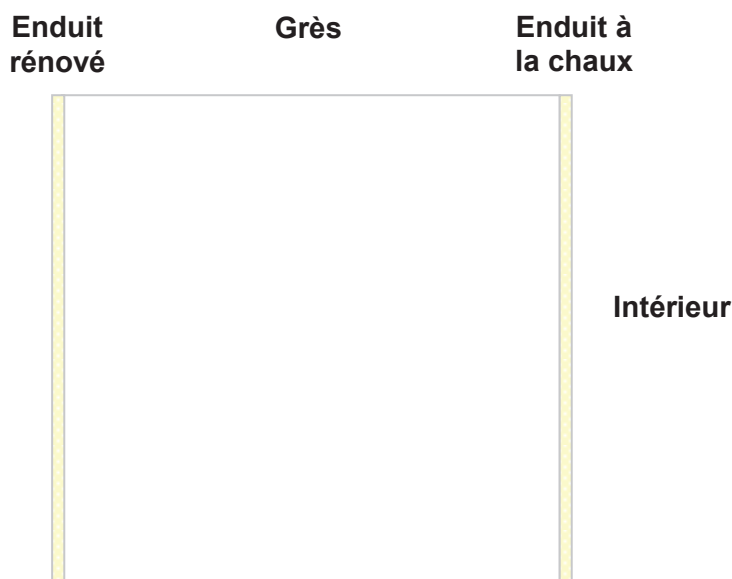
de la colle, combiné à la perméabilité à la vapeur d'eau plus élevée dans l'air que dans la colle.

- La teneur en eau du grès au contact avec l'enduit extérieur connaît des pics importants en hiver. Cependant avec un enduit perméable à la vapeur d'eau, cette couche limite de grès parvient à sécher chaque été de façon significative.

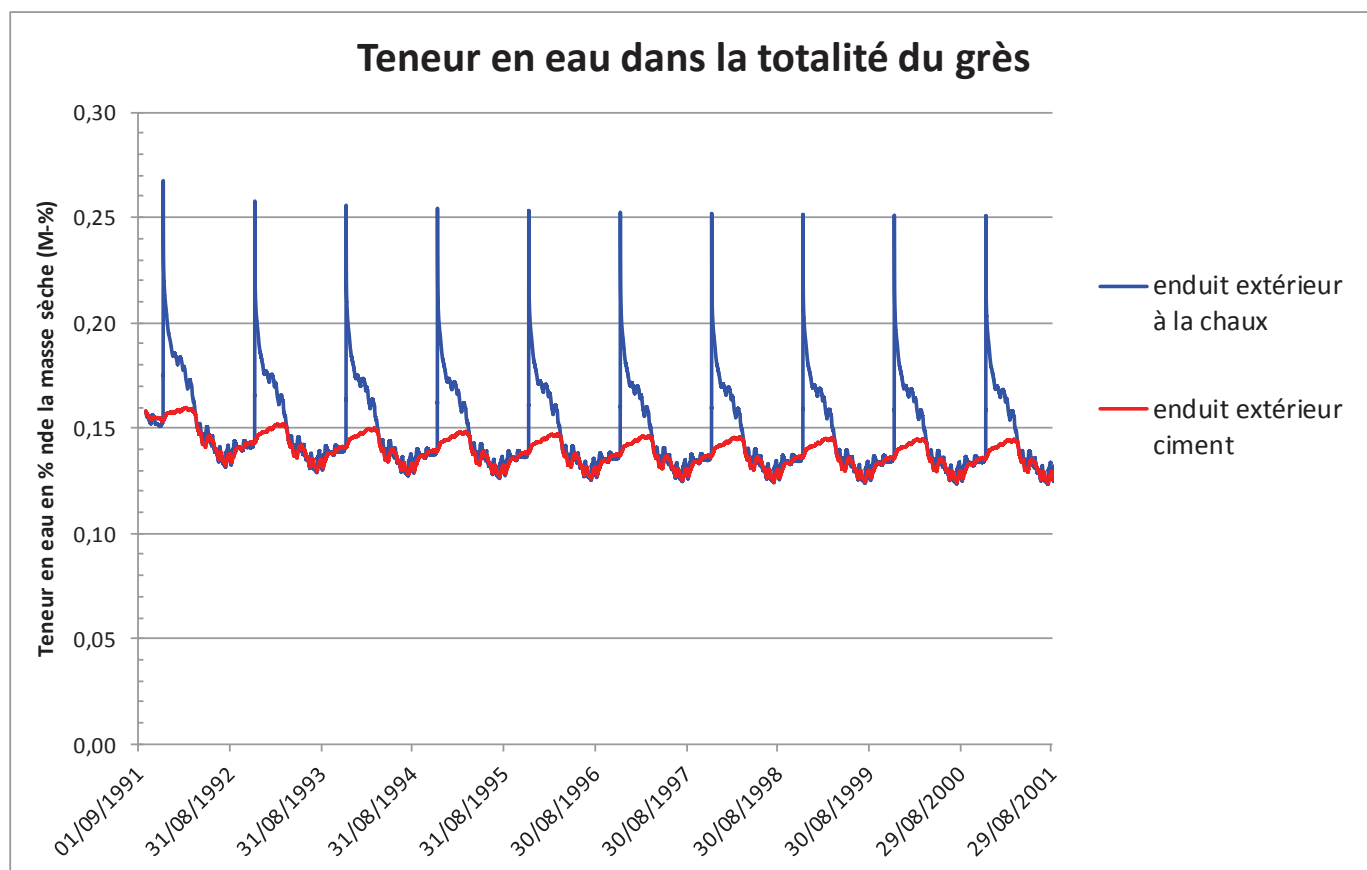
Nos résultats ne nous permettent pas de proscrire le PSE en isolation intérieure. Cependant, le Multipor très hygroscopique, peut absorber une grande quantité d'eau sans que cela mette sa pérennité en danger. Cela est très avantageux dans le cas d'une charge d'eau soudaine du mur (fuite par exemple). Le PSE non hygroscopique ne peut pas absorber d'eau. C'est pourquoi **il nous semble préférable d'employer le Multipor en isolant intérieur plutôt que le PSE.**

2.5 RESULTATS RENOVATION SANS AMELIORATION THERMIQUE

Dans ce paragraphe, nous étudions la rénovation de l'enduit extérieur à la chaux par un enduit à base de ciment.



Nous étudions ce qu'il se passe dans la totalité de la couche de grès.



Tout d'abord, la quantité d'eau dans le grès reste stable d'année en année.

En revanche, la quantité d'eau dans le grès est plus élevée avec un enduit extérieur à la chaux qu'avec un enduit ciment. Le pic rencontré dans le cas de l'enduit extérieur à la chaux est lié aux conditions climatiques extérieures. En effet, l'enduit chaux étant plus perméable que le ciment, il permet à l'eau de pluie d'entrer dans la paroi.

Cependant, il permet aussi à cette eau de sécher pendant l'été, de sorte que la quantité d'eau dans le grès en été est la même quel que soit le type d'enduit extérieur.

Les simulations WUFI ne prennent pas les remontées capillaires en compte. Or cet aspect est particulièrement important dans l'étude de l'impact de la rénovation de l'enduit extérieur. En effet dans le cas d'une remontée d'eau dans le mur, un enduit extérieur à la chaux permettra l'évacuation de cette eau vers l'extérieur, un enduit ciment le permettra moins. La non-prise en compte de ce phénomène donne à la pluie un rôle trop important dans nos simulations, ce qui fausse les conclusions.